

Projet n°AURG/2/161

Aval Fonio

Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique

WORK PACKAGE 3

Amélioration des techniques de transformation et de stabilisation du fonio

Livrable 12

Séchage du fonio – Le séchoir à flux traversant CSec-T



Auteurs:

CRUZ Jean-François, RIVIER Michel, KÉBÉ Cheikh Mouhamed Fadel, DIALLO Abdoul, ANNE Alkassoum Abdoulaye
MÉOT Jean-Michel

Coordination générale du projet : CRUZ Jean-François (Cirad)

Coordination du projet au Sénégal : KÉBÉ Cheikh Mouhamed Fadel (ESP-UCAD)

CIRAD (Centre de Coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) – France

ESP-UCAD (Ecole Supérieure Polytechnique / Université Cheikh Anta Diop) - Sénégal

Janvier 2017



Union Africaine



Union Européenne
Procédure EuropeAid

Projet n°AURG/2/161

Aval Fonio

Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique

WORK PACKAGE 3

Amélioration des techniques de transformation et de stabilisation du fonio

Livrable 12

Séchage du fonio – Le séchoir à flux traversant CSec-T

Coordination générale du projet : CRUZ Jean-François (Cirad)

Coordination du projet au Sénégal : KÉBÉ Cheikh Mouhamed Fadel (ESP-UCAD)

CIRAD (Centre de Coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) – France

ESP-UCAD (Ecole Supérieure Polytechnique / Université Cheikh Anta Diop) - Sénégal

Janvier 2017

Auteurs:

CRUZ Jean-François (1), RIVIER Michel (1), KÉBÉ Cheikh Mouhamed Fadel (2), DIALLO Abdoul (2), ANNE Alkassoum Abdoulaye (2), MÉOT Jean-Michel (1)

(1) Cirad (Centre de Coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement)
UMR QualiSud, Département PERSYST, TA B-95/16, 73 rue Jean François Breton,
34398 Montpellier Cedex 5, France.

(2) ESP – UCAD (Ecole Supérieure Polytechnique – Université Cheick Anta Diop), Dakar Fann, Sénégal.

Ce travail a été réalisé en partenariat avec

En France

GOLI Thierry (Cirad, UMR QualiSud, WP3)

DELPECH Antoine (Cirad, UMR QualiSud, WP3)

FERRÉ Thierry (Cirad, UMR Innovation, WP4)

Au Sénégal

Mme SOW Adjil Madjiguene (ESP-UCAD, WP3)

SAMBOU Vincent (ESP-UCAD)

WANE Ousmane (ESP-UCAD)

Au Burkina Faso

MÉDAH Ignace (IRSAT, WP4)

HAVARD Michel (Cirad)

Mme TRAORÉ Asséto (Société « Tout Super », Ouagadougou)

Mme OUEDRAOGO Asséta (Société «EOBA», Ouagadougou)

OUATTARA Mamadou (Entreprise Soldev, Bobo-Dioulasso)

Au Mali

Mmes DEM Aïssata et DEM Halatou (Directrices Danaya Céréales, Bamako)

Mme BORÉ Fanta GUINDO (IER, WP3)

TANGARA Kola (IER, WP3)

DIARRA Moussa (Mod- Engineering, Equipementier à Bamako)

Les auteurs souhaitent également remercier :

- tous les personnels des entreprises Danaya Céréales (Mali) et Tout Super (Burkina Faso) qui ont participé aux essais des différents séchoirs « flux traversant CSec-T » depuis l'origine et les GIE de Salémata (Sénégal).
- tous les agents des instituts de recherche qui ont participé aux différentes activités du projet Aval Fonio dans le cadre du WP3 «Amélioration des techniques de transformation et de stabilisation du fonio ».

Nota : Ce travail est soutenu financièrement par l'Union Africaine (procédure EuropeAid). Il ne reflète pas nécessairement les vues et en aucun cas ne préfigure la politique future de l'Union Africaine dans le domaine.

Photo de couverture :

Formation à l'utilisation du séchoir CSecT à Bobo Dioulasso au Burkina Faso (© T. Ferré, Cirad)

Table des matières

1. Introduction	2
2. Séchage du fonio transformé.....	2
3. Le séchoir à flux traversant CSec-T	3
3.1. Séchoir à flux traversant expérimental.....	3
3.1.1. Principe de séchage avec claies permutées	3
3.1.2. Module de séchage avec claies.....	3
3.1.3. Séchoir a flux traversant expérimental testé au Burkina Faso	4
3.1.4. Conclusion partielle.....	5
3.2. Conception du séchoir à flux traversant CSec-T.....	5
3.2.1. Principe de fonctionnement.....	5
3.2.2. Description du séchoir CSec-T	5
3.2.3. Protocole d'utilisation du séchoir CSec-T	6
3.3. Essais de validation du séchoir CSec-T au Mali	7
4. Le séchoir CSec-T dans le cadre du projet Aval Fonio.....	8
4.1. Fabrication et instrumentation du séchoir CSec-T au Sénégal	8
4.2. Essais de validation du séchoir CSec-T	9
4.3. Transfert du séchoir CSec-T en milieu réel	9
4.3.1. Implantation du séchoir CSec-T au Sénégal Oriental	9
4.3.2. Transfert du séchoir CSec-T en milieu réel au Burkina Faso	10
4.4. Essai de fonctionnement du séchoir CSec-T	11
4.4.1. Conditions de réalisation de l'essai de séchage	11
4.4.2. Calcul de l'efficacité énergétique du séchoir CSec-T.....	12
5. Proposition d'évolution du séchoir CSec-T	12
5.1. Nouvelle conception du séchoir à flux traversant CSec-T.....	12
5.2. Nouveau protocole d'utilisation du séchoir CSec-T	13
5.3. Intérêt de la proposition d'amélioration du séchoir CSec-T	13
6. Conclusion.....	14
7. Bibliographie	14

1. Introduction

Le séchage des grains est nécessaire pour éviter les risques d'altération par les moisissures au cours du stockage. Pour assurer une bonne conservation, leur activité en eau ou *aw* (*activity of water*) doit en général être inférieure à 0,6; seuil au-dessous duquel les micro-organismes ne peuvent pas se développer et où l'activité enzymatique est bloquée (Cruz *et al.*, 2016e). Les grains de fonio paddy doivent ainsi être séchés jusqu'à une humidité de sauvegarde inférieure ou égale à 11 % et les grains de fonio transformé (fonio blanchi, fonio précuit...) jusqu'à une humidité voisine de 10 %.

2. Séchage du fonio transformé

Après les opérations de lavage, de dessablage et de précuisson, les grains de fonio blanchis se trouvent réhumidifiés jusqu'à une teneur en eau souvent supérieure à 30 %. Il est alors indispensable de les sécher jusqu'à une humidité voisine de 10 % afin d'assurer une bonne conservation. Au niveau des petites unités de transformation (groupements de femmes, petites agro-industries...) le séchage des produits du fonio (fonio blanchi lavé, fonio précuit...) est souvent réalisé par une exposition directe au soleil en étalant les grains sur des nattes ou des plateformes recouvertes d'un tissu ou d'un plastique. Durant le séchage les grains risquent alors d'être pollués par diverses impuretés (poussières, fientes d'oiseaux...) qui déprécient considérablement le fonio (Cruz *et al.*, 2011).

Au cours d'un précédent projet intitulé *INCO FONIO* (2006-2008) financé par l'Union Européenne, deux types de séchoirs ont été conçus afin d'améliorer la qualité du fonio commercialisé. Il s'agit d'un séchoir solaire de type «serre» (CSec-S) et d'un séchoir à claies de type traversant (CSec-T).

Dans le cadre du WP3 «Amélioration des technologies de transformation et de stabilisation du fonio technologies post-récolte du fonio», du projet *Aval Fonio* (figure 1), les activités avaient pour objectif d'améliorer et de valider ces premiers prototypes en collaboration avec des équipementiers locaux et des petites entreprises de transformation du fonio (Cruz *et al.*, 2016a).

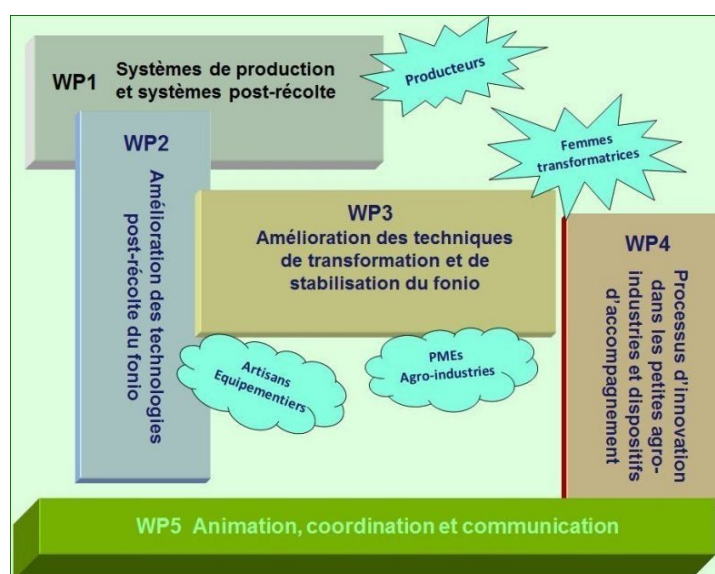


Figure 1. Schéma des workpackages du projet Aval Fonio (© J-F Cruz, Cirad)

3. Le séchoir à flux traversant CSec-T

3.1. Séchoir à flux traversant expérimental

3.1.1. Principe de séchage avec claies superposées

A l'origine, le séchoir à flux traversant a été conçu par le Cirad pour le séchage de produits roulés ou granulés (couscous, bouillie, dégué, moni, araw, thiakry...). L'idée de base est d'améliorer le rendement énergétique d'un séchoir en réalisant un séchage à contre-courant pour assurer une meilleure saturation de l'air de séchage (figure 2).

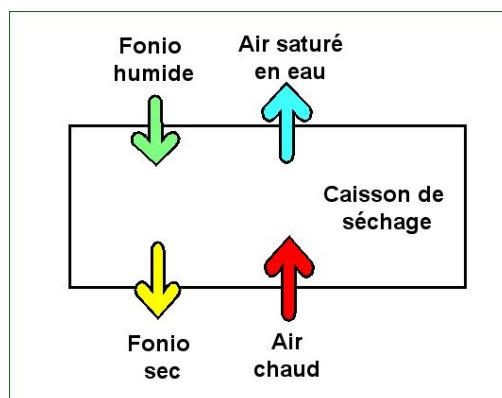


Figure 2. Schéma de principe du contre-courant

Ce principe est mis en œuvre en utilisant le pouvoir séchant résiduel de l'air qui a traversé une claie 1 inférieure pour pré-sécher le produit humide chargé dans une claie 2 supérieure (figure 3).

Une première maquette, permettant de valider le principe de séchage à flux traversant avec claies superposées, a été fabriquée et testée dans la halle de technologie agroalimentaire du Cirad dès le début des années 2000. La maquette était ainsi constituée de 2 claies circulaires de 400 mm de diamètre surmontant un répartiteur d'air chaud. Le générateur d'air chaud était une enceinte de chauffage ouverte équipée d'un brûleur à gaz. Un ventilateur aspirait l'air chaud, constitué du mélange d'air ambiant et de gaz de combustion, dans l'enceinte et le refoulait dans le répartiteur d'air. Le réglage de débit du gaz permettait de réguler la puissance de chauffe du dispositif (Marouzé *et al.*, 2001).

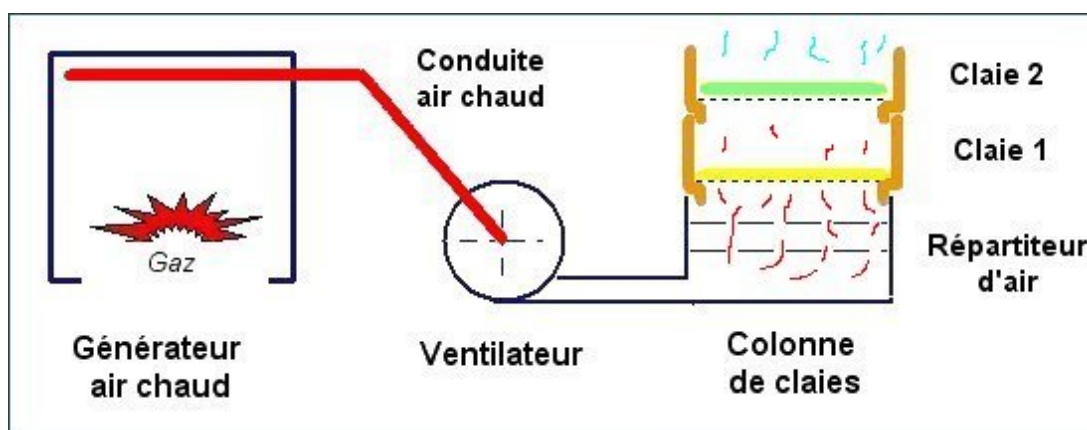


Figure 3. Schéma du dispositif avec claies superposées (© Cirad)

3.1.2. Module de séchage avec claies superposées

Après que la validation du principe sur maquette ait été effectuée, une étude menée début 2005 a conduit à la réalisation d'un module de séchage plus abouti constitué d'une cellule de séchage comportant 3 claies superposées d'une surface de 0,56 m² chacune (total de 1,7 m²). Les dimensions du module de séchage étaient de L = 1,2 m x l = 0,72 m x H = 1 m (figure 4). Des essais, réalisés dans la halle de technologie du Cirad à Montpellier, ont donné de bons résultats de séchage sur du couscous à granulation moyenne choisi comme aliment modèle. La température d'attaque de l'air chaud était voisine de 60°C (Gomez Eslava, 2005).

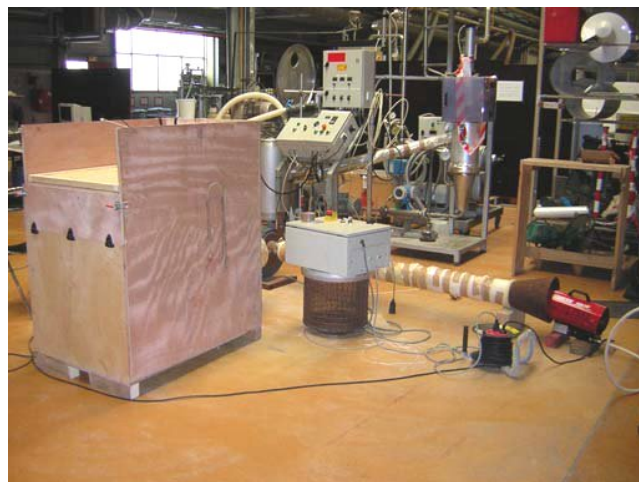


Figure 4. Module de séchage testé au Cirad (© Cirad)

3.1.3. Séchoir a flux traversant expérimental testé au Burkina Faso

En juin 2005, un premier séchoir expérimental appelé SFT a été conçu par le Cirad pour répondre aux besoins en séchage d'une PME burkinabé de Ouagadougou (Société «*Tout Super*») qui transforme et commercialise des produits roulés à base de céréales (mil, maïs, sorgho..) et du fonio précuit. Le calcul des besoins a conduit à proposer un séchoir expérimental composés de 3 cellules équipées chacune de 4 claies d'une surface utile d'environ 0,5 m² chacune (figure 5).



Démonstration par J-M Méot et C. Marouzé du Cirad



Claie chargée de produits roulés

Figure 5. Premier séchoir expérimental SFT testé au Burkina Faso (© M. Rivier, Cirad)

Un séchoir expérimental a été fabriqué par la société Isomet de Ouagadougou et des essais de séchage ont été conduits avec succès sur du dégué, de la bouillie de mil et du fonio précuit. Des résultats synthétiques sont donnés dans le tableau 1 suivant

Tableau 1 : Performances du séchoir expérimental

Produit	Humidité initiale (b.h.)	Humidité finale (b.h.)	Débit d'air par cellule	Durée de séchage
Dégué	53,0 %	10 %	400 m ³ /h	2h30
Bouillie	40,5 %	10 %	400 m ³ /h	2h
Fonio précuit	30,5 %	10 %	250 m ³ /h	2h30

Avec une température d'attaque de l'air chaud voisin de 55 °C, le débit moyen du séchoir est d'environ 16 kg/h de produit sec avec une qualité des produits jugée satisfaisante par les opératrices notamment pour le dégué et le fonio précuit (Méot *et al.*, 2005).

3.1.4. Conclusion partielle

Les recherches expérimentales menées par le Cirad de 2000 à 2005, ont permis de définir les principales caractéristiques d'un séchoir à flux traversant SFT à haut rendement thermique. Les essais du premier séchoir expérimental en milieu réel au Burkina Faso ont montré qu'un tel séchoir pouvait répondre aux besoins en séchage des PME productrices de produits roulés.

Dès 2001, le Cirad avait proposé aux partenaires du premier projet CFC Fonio de développer un séchoir de ce type pour les PME productrices de fonio précuit. Mais c'est à regret que l'idée avait été abandonnée car, à l'époque, les partenaires n'avaient pas suffisamment perçu l'intérêt de développer un séchoir à haut rendement énergétique (60 %) en comparaison aux séchoirs classiques alors en cours de diffusion en Afrique de l'Ouest (séchoir Atesta au Burkina Faso, séchoir FAC 2000 au Mali...) et dont l'efficacité énergétique est généralement faible (20% à 30%).

C'est finalement dans le cadre du projet européen INCO Fonio « *Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio en Afrique de l'Ouest* » (2006-2008) que l'idée a été reprise et que les recherches ont pu aboutir à la conception du séchoir CSec-T tel qu'il est aujourd'hui proposé.

3.2. Conception du séchoir à flux traversant CSec-T

3.2.1. Principe de fonctionnement

Le séchoir « à flux traversant » a été développé par le Cirad sous le nom de « séchoir CSec-T » pour le séchage de produits granuleux (fonio, couscous, bouillie...). Le flux d'air doit pouvoir traverser la masse de produit sans l'entraîner ; ce principe ne convient donc pas pour les farines ou les produits comportant une part de farines (Marouzé *et al.*, 2008).

Le principe du séchoir à flux traversant est de créer un mouvement à contre-courant entre d'une part, le flux d'air chaud qui progresse de bas en haut dans chaque cellule et d'autre part, le produit à sécher réparti dans des claies qui sont périodiquement descendues, d'un niveau supérieur 4 (produit humide) jusqu'au niveau inférieur 1 (produit sec) comme cela est illustré en figure 6.

Le flux d'air chaud qui traverse la masse de produit favorise les échanges de matière et de chaleur. Lorsque le produit de la claie inférieure est sec, elle est alors retirée, puis les claies supérieures sont descendues d'un niveau; la claie supérieure étant alors rechargée en produit humide. Cette pratique permet de bien saturer l'air de séchage et d'accroître ainsi l'efficacité énergétique et la productivité du séchoir (Cruz *et al.*, 2008).

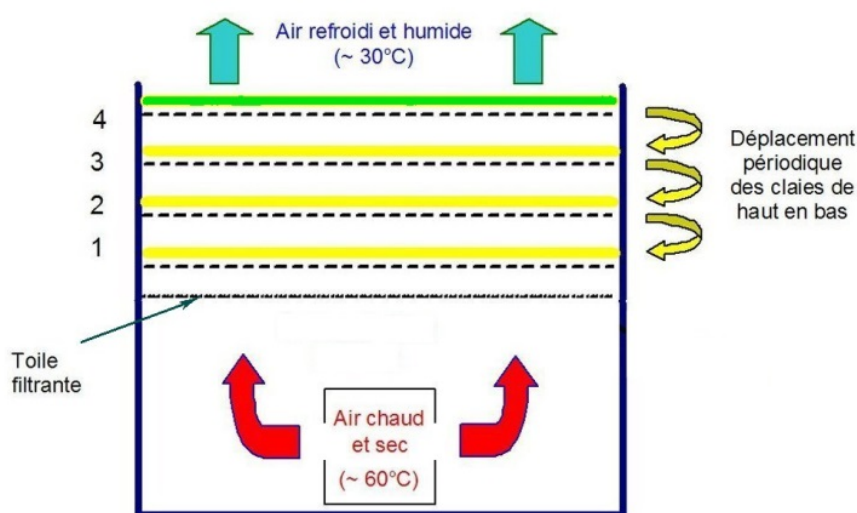


Figure 6. Principe du séchoir à claies à flux traversant (© C. Marouzé, Cirad).

3.2.2. Description du séchoir CSec-T

Le séchoir CSec-T est constitué de trois cellules contenant chacune quatre claies superposées (figure 7). Il comprend un générateur d'air chaud (brûleur à gaz) et un ventilateur entraîné par un moteur électrique. Le séchoir est réalisé en bois contreplaqué et l'ensemble générateur d'air chaud est métallique.

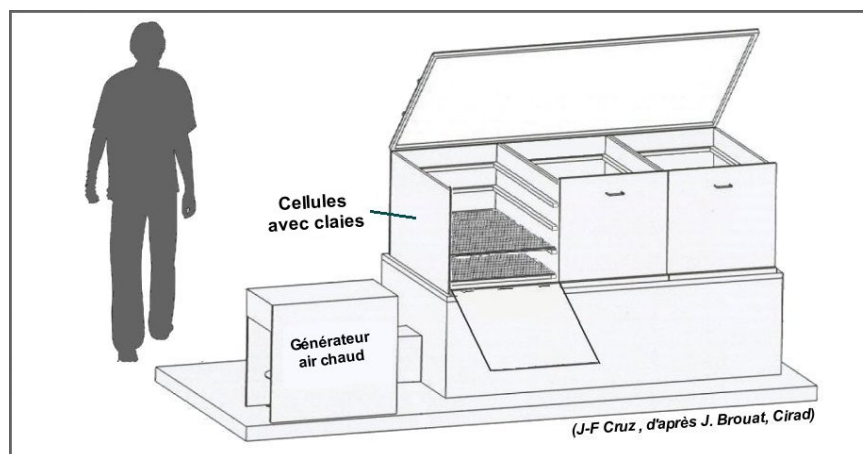


Figure 7. Le séchoir à flux traversant CSec-T (© J-F Cruz, Cirad).

Les caractéristiques du séchoir CSec-T sont données dans le tableau 2 suivant:

Tableau 2 : Caractéristiques du séchoir CSec-T

Longueur	2 m
Largeur	1 m
Hauteur	1 m
Surface totale des claies	5,4 m ²
Charge par claie	5 - 6 kg (soit ~ 12 kg/m ²)
Puissance du brûleur à gaz	8 à 10 kW
Ventilateur centrifuge	

Chaque cellule est équipée d'une porte qui donne accès aux différentes claies. Les claies sont constituées d'un cadre en bois et d'un grillage métallique galvanisé supporté par des raidisseurs. Au niveau de chaque claie, le fonio est étalé sur un tissu polyester de type voilage qui permet de contenir le produit et de le récupérer une fois sec.

L'air chaud propulsé par le ventilateur est introduit dans le séchoir par une gaine puis il traverse les différentes claies de bas en haut permettant ainsi le séchage du produit. Les vitesses d'air à l'attaque des claies doivent être limitées de 0,2 à 0,3 m/s pour éviter l'entraînement des grains. (Cruz *et al.*, 2011)

3.2.3. Protocole d'utilisation du séchoir CSec-T

Le protocole d'utilisation du séchoir CSec-T est illustré en figure 8 suivante :

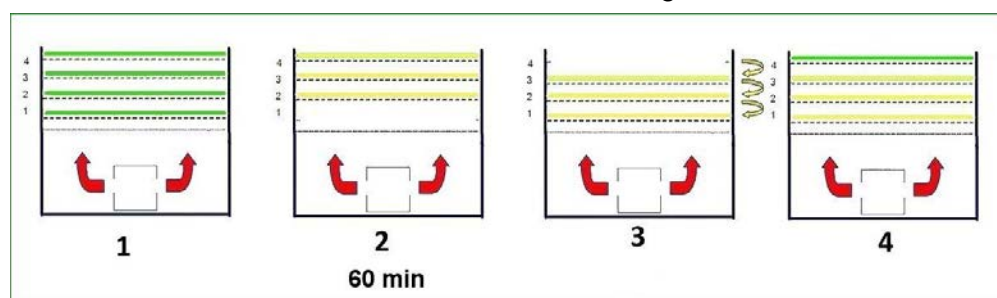


Figure 8. Séchage avec déplacements des claies (© J-F Cruz, Cirad).

Etape 1: en début de séchage, on doit charger chaque cellule du séchoir avec 4 claies de produit humide. Pour du fonio précuit, on étale environ 5 - 6 kg de fonio humide par claie.

Etape 2: lorsque le produit de niveau 1 est sec, il faut retirer la claie en position 1 et la vider

Etape 3

- retirer la claie en position 2, brasser le produit et la descendre en position 1,
- retirer la claie en position 3, brasser le produit et la descendre en position 2,
- retirer la claie en position 4, brasser le produit et la descendre en position 3,
- fermer la porte de la cellule pour éviter les pertes d'air chaud

Etape 4

- mettre la claie qui a été vidée puis rechargée en produit humide en position 4.

Puis poursuivre ainsi le séchage jusqu'à épuisement du lot de produit. Pour du fonio précuit, il est généralement nécessaire de réaliser la première permutation des claies après 60 minutes de séchage puis ensuite toutes les 30 minutes.

L'utilisation du séchoir nécessite la présence d'un opérateur pour contrôler l'humidité du produit sur les claies basses en position 1, pour retirer et vidanger les claies sèches, pour descendre les claies, recharger les claies vides en produits humides et les placer en position haute.

3.3. Essais de validation du séchoir CSec-T au Mali

C'est dans le cadre du projet INCO Fonio, qu'un premier modèle de séchoir CSec-T a été installé en 2006 à Bamako (Mali) au sein de l'entreprise Danaya Céréales qui produit et commercialise du fonio précuit et des produits roulés (dégué, moni...). Le séchoir a été fabriqué par l'entreprise Mod Engineering de Bamako sous la supervision du Cirad (figure 9).



Figure 9. Le séchoir CSec-T dans l'entreprise Danaya Céréales à Bamako (© J-F Cruz, Cirad).

Pour les essais de séchage effectués chez Danaya Céréales, la partie basse de l'enceinte a été réalisée en tôle mais ce n'était qu'une solution transitoire. Par la suite, toutes les cellules de séchage seront réalisées en bois pour ses qualités isolantes.

Les premiers tests du séchoir CSec-T ont été réalisés par le Cirad (C. Marouzé, J-F. Cruz) à la fin de l'année 2006 en collaboration avec le Laboratoire de Technologie Alimentaire de l'IER (D. Dramé, M. Diarra, K. Tangara) et le personnel de l'entreprise Danaya Céréales. Puis l'entreprise a intégré le séchoir dans son unité de fabrication et un suivi du fonctionnement a été réalisé par l'IER jusqu'à la période humide d'hivernage de juillet/août 2007. Un résultat représentatif de la performance du séchoir est synthétisé dans le tableau 3 suivant.

Tableau 3. Performances du séchoir CSec-T

Séchoir à flux traversant CSec-T	
Fonio précuit humide	98 kg
Humidité initiale du fonio précuit	31,1%
Fonio précuit sec	72,8 kg
Humidité finale du fonio	7,3 %
Durée totale du séchage	4 h

Selon la Directrice de l'entreprise (Mme DEM), le séchoir CSec-T présente plusieurs avantages :

- Bonne capacité de séchage car son débit d'une centaine de kg en 4 h peut permettre de sécher 200 à 300 kg de fonio précuit par jour si l'on effectue un approvisionnement semi-continu.
- Pas de différence de séchage entre la saison humide et la saison sèche
- Consommation en gaz inférieure à celle d'autres séchoirs à gaz (par ex. Fac 2000).

Le principal inconvénient reste la nécessité de déplacer fréquemment les claies de séchage (permutation des claies chaque 30 minutes) pour obtenir un séchage efficace.

En 2008, le coût d'utilisation du séchoir CSec-T était estimé à 35 FCFA/kg pour un investissement initial d'environ 1 MFCFA (Marouzé *et al.*, 2008).

4. Le séchoir CSec-T dans le cadre du projet Aval Fonio

Dans le cadre du WP3 «Amélioration des technologies de transformation et de stabilisation du fonio technologies post-récolte du fonio», du projet Aval Fonio, les activités ont consisté à chercher, en collaboration avec les opérateurs locaux, à améliorer ce premier séchoir CSec-T installé au Mali et à bien valider ses performances pour pouvoir le transférer auprès d'opérateurs privés.

4.1. Fabrication et instrumentation du séchoir CSec-T au Sénégal

Au cours de l'année 2014, un séchoir à flux traversant a été fabriqué à Dakar selon les plans de fabrication fournis par le Cirad (Méot *et al.*, 2016) et avec l'appui du département Génie Mécanique de l'ESP-UCAD (figure 10). La structure du séchoir est en bois alors que le générateur d'air chaud, le ventilateur, la gaine d'amenée d'air et les châssis supports sont métalliques.



Figure 10. Le séchoir CSec-T fabriqué à Dakar (© ESP)

Les claies rectangulaires sont réalisées en bois avec un fond en treillis métallique et leur dimension est de $L = 0,85 \text{ m} \times l = 0,53 \text{ m}$, soit une surface de $0,45 \text{ m}^2$. Le total des 12 claies représente ainsi une surface utile de $5,4 \text{ m}^2$ soit une charge totale du séchoir de 60 à 70 kg de produit humide.

Pour la réalisation des essais, le séchoir CSec-T a été instrumenté avec les éléments suivants:

- capteur de mesure de la température en sortie du ventilateur,
- capteur de mesure de la température sous chacune des claies inférieures,
- thermo-hygromètre portable (mesure air ambiant et en sortie des colonnes de séchage),
- balance de pesée de la bouteille de gaz pour mesure de la quantité de gaz consommée.
- peson (sur portique) pour la pesée de claies témoins

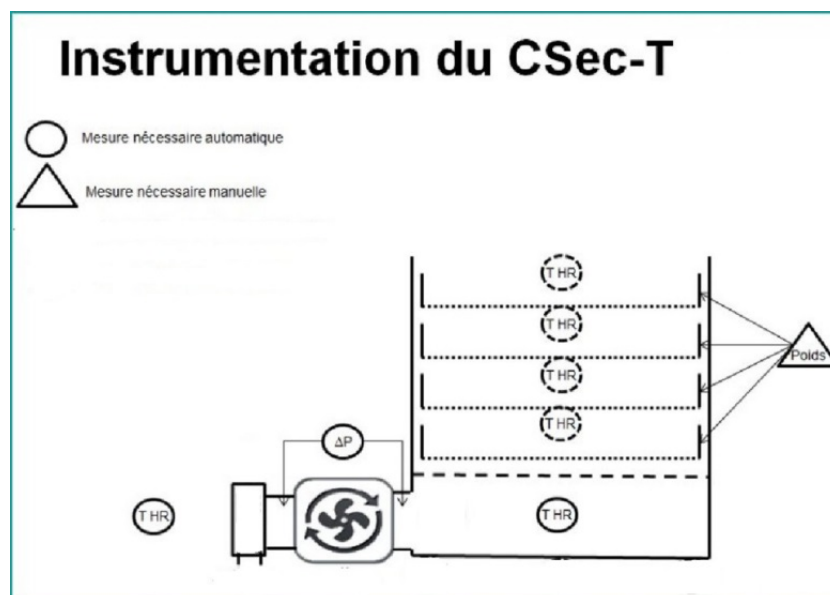


Figure 11. Instrumentation du séchoir CSec-T

4.2. Essais de validation du séchoir CSec-T

Les essais de validation du séchoir CSec-T ont été réalisés à l'ESP-UCAD en mars 2015 à l'occasion d'une mission d'appui du Cirad (Rivier, 2015). Ces essais ont porté sur le séchage de 90 kg de fonio précuit réhumidifié jusqu'à 35%. (soit 6 kg de fonio humide sur chacune des 12 claies du séchoir avec un seul renouvellement sur les claies supérieures.)

La température de l'air ambiant, environ 25°C, est portée à 45°C par passage au brûleur de 4 kW. Le produit des claies inférieures, à l'attaque de l'air chaud, a été séché après 2h45 de fonctionnement et le séchage total du lot a été réalisé après 5h40. La vitesse de l'air à l'attaque des grains a été limitée à 0,2 m/s pour éviter l'envol des grains en fin de séchage.



Figure 12. Essai du séchoir CSec-T à Dakar (© ESP)

La quantité d'eau évaporée au cours du séchage a été mesurée égale à 23,85 kg et la consommation en gaz butane a été de 2,9 kg. En considérant un PCI du gaz butane de 45 600 kJ/kg la quantité d'énergie consommée au cours de l'essai a donc été de 132 240 kJ. En rapportant cette valeur à la quantité d'eau évaporée, on obtient alors une consommation thermique spécifique de 5 545 kJ par kg d'eau évaporée (soit environ 1 540 kWh par tonne d'eau évaporée).

Dans les conditions de l'essai et en considérant une chaleur latente de vaporisation de l'eau de 2500 kJ/kg d'eau évaporée, le rendement énergétique du séchoir CSec-T a été d'environ 45%.

Ces essais montrent que le séchoir CSec-T a permis d'obtenir un assez bon rendement de séchage malgré des conditions d'utilisation qui n'étaient pas optimales puisque le séchoir n'a été rechargé qu'une unique fois en produit humide. En conditions normales d'utilisation, avec un séchoir pleinement rempli, un rendement énergétique supérieur à 50 % (consommation thermique spécifique inférieure à 5000 kJ/kg d'eau évaporée) pourra être obtenu alors que les séchoirs classiquement utilisés en convection naturelle (du type séchoir Atesta) ont un rendement énergétique souvent inférieur à 20 % (Rivier, 2015).

Dans les conditions de l'essai, le séchoir CSec-T a permis de sécher du fonio précuit de 35% à environ 10% à un débit de 20 à 25 kg/h. avec une nécessité de manutention des claies toutes les 30 à 40 min. Pour améliorer les performances du séchoir (diminution du temps de séchage), il apparaît nécessaire d'accroître la puissance du brûleur (jusqu'à 8 kW) pour atteindre des températures d'air chaud de l'air à l'attaque du produit de 60 à 65°C (Cruz *et al.*, 2016b).

4.3. Transfert du séchoir CSec-T en milieu réel

4.3.1. Implantation du séchoir CSec-T au Sénégal Oriental

A la fin de l'année 2015, le séchoir à flux traversant CSec-T, fonctionnant au gaz, a été transféré à Salémata (Sénégal Oriental). Le séchoir a été installé pour bénéficier à un regroupement de 10 GIE de femmes transformatrices de fonio identifié lors d'une mission réalisée en 2013 (Kébé *et al.*, 2013).



Figure 13. Séchoir CSecT à Salémata (© ESP)



Figure 14. Formation des opératrices (© ESP)

Après avoir réalisé deux jours de démonstration qui ont permis de sécher environ 150 kg de fonio précuit, le Responsable du projet Aval Fonio au Sénégal (C. M. F. Kébé) a formé les femmes à l'utilisation du séchoir à fonio. Les transformatrices, très enthousiastes et motivées, ont continué à utiliser le séchoir et à transmettre les informations recueillies (quantités séchées, consommation en gaz...) à l'ESP-UCAD de Dakar (Cruz *et al.*, 2016b). La description des expérimentations en entreprise du séchoir CSec-T est l'objet du livrable 14.

4.3.2. Transfert du séchoir CSec-T en milieu réel au Burkina Faso

4.3.2.1. Fabrication du séchoir CSec-T à Bobo-Dioulasso

Au Burkina Faso, deux séchoirs à flux traversant CSec-T ont été construits à Bobo Dioulasso par l'entreprise SOLDEV assisté d'un fabricant de séchoir (A. Souaré) avec l'appui d'un technicien du Cirad (A. Delpech) et sous l'égide des responsables (T. Ferré et I. Medah) du WP4 "Processus d'innovation dans les petites agro-industries de transformation du fonio".



Figure 15. Fabrication du séchoir chez Soldev à Bobo Dioulasso au Burkina Faso(© T. Ferré, Cirad)

4.3.2.2. Formation à l'utilisation du séchoir CSec-T

Deux sessions de formation à l'utilisation des séchoirs CSec-T ont été réalisées à Bobo Dioulasso pour une quinzaine de transformatrices et transformateurs de fonio de l'Ouest du Burkina Faso et de Ouagadougou. Elles ont été organisées, en mars 2016, à l'IRSAT de Bobo Dioulasso et assurées par les chercheurs et techniciens du Cirad, de l'IRSAT, de l'ESP-UCAD. Une animatrice, en charge de l'accompagnement des transformatrices pour l'ONG Afrique verte Burkina – Aprossa, (Mme M. L. Dipama) et les deux fabricants de séchoirs ont également participé à cette formation

Pour aider à la formation des opérateurs, un manuel d'utilisation du séchoir CSec-T a été élaboré. Il fait l'objet du livrable 15 du projet Aval Fonio (Cruz *et al.*, 2016c).

A l'issue de la formation, les 2 séchoirs CSec-T ont été installés dans 2 PME transformatrices de fonio pour y être suivis en conditions réelles d'utilisation. Ces 2 PME, « *Tout Super* » à Toussiana et *EOBA* à Ouagadougou, ont été sélectionnées car elles ont toujours étroitement collaboré avec les chercheurs travaillant pour l'amélioration de la filière fonio en Afrique de l'Ouest (Cruz *et al*, 2016a).



Figure 16. Formation à l'utilisation du séchoir CSecT à Bobo Dioulasso au Burkina Faso (© T. Ferré, Cirad)

Durant la formation, un essai de fonctionnement a été réalisé avec les opérateurs privés pour apprécier les performances du séchoir et montrer son efficacité en termes de rapidité de séchage et de consommation énergétique.

4.4. Essai de fonctionnement du séchoir CSec-T

4.4.1. Conditions de réalisation de l'essai de séchage

Le séchoir CSecT a été chargé de 55 kg de fonio blanchi précuit humide (humidité d'environ 35%) selon une répartition sur les claies illustrée par la figure 17 et précisément: 5 kg de fonio humide sur chacune des 9 claies inférieures et 3,3 à 3,4 kg sur les claies supérieures.

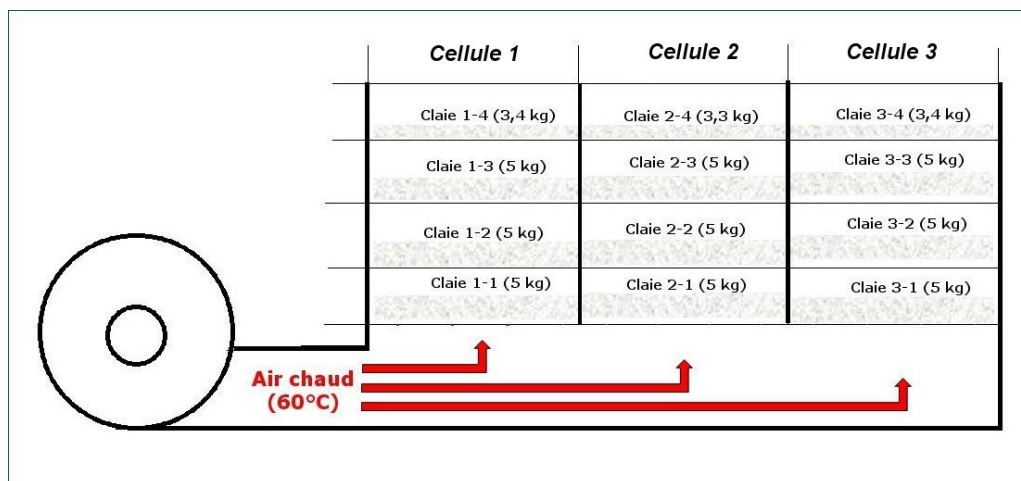


Figure 17. Schéma de chargement du séchoir CSecT (© J-F Cruz, Cirad)

La température de l'air chaud à la sortie du ventilateur a été maintenue à 60°C. La température d'attaque du produit a été observée comme homogène sur les 3 cellules du séchoir.

Une heure après le démarrage du séchoir, les claies du niveau bas ont été pesées pour apprécier l'évolution du séchage. Les valeurs ont été relevées : C1.1 : 3,5 kg ; C1.2 : 3,4 kg ; C1.3 : 3,5 kg. Ces différentes valeurs montrent qu'après une heure de séchage le fonio des claies du niveau bas est sec. On constate qu'il a même été légèrement surséché car la masse finale de 5 kg de fonio humide à 35 % et séché à 10 % devrait être de 3,6 kg (sauf si l'humidité initiale du produit était supérieure à 35 %). Après permutation des claies, toute la quantité de fonio (55 kg) a été séchée en 2h20min (Diallo, 2016).

4.4.2. Calcul de l'efficacité énergétique du séchoir CSec-T

4.4.2.1. Quantité de gaz consommé et puissance du brûleur

La pesée de la bouteille de gaz avant et après essai permet de connaître la quantité de gaz consommée sur la durée de l'essai soit 1,5 kg de gaz en 2h20min. La puissance du brûleur est calculée en considérant la puissance calorifique dégagée de $1,5 \times 45\,600 = 68\,400$ kJ (avec un pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz butane de 45 600 kJ/kg). Cette puissance calorifique dégagée de 68 400 kJ représente 19 kWh soit pour une durée de séchage de 2h20 min une puissance du brûleur de : $19 / 2,33 = 8,1$ kW.

4.4.2.2. Rendement énergétique du séchoir CSec-T

Au cours de l'essai, la quantité totale d'eau extraite du fonio par séchage a été de 16,1 kg. La quantité d'énergie apportée par kg d'eau évaporée est donc de : $68\,400/16,1 = 4\,248$ kJ/kg. Avec une chaleur de vaporisation de l'eau de 2 500 kJ par kg d'eau évaporée, la consommation théorique d'un séchoir (à 100% de rendement) aurait dû être de : $2\,500 \times 16,1 = 40\,250$ kJ. Or la consommation a été de 68 400 kJ donc le rendement énergétique du séchoir CSec-T obtenu dans les conditions de l'essai a été de $40\,250 / 68\,400 = 59\%$ (Cruz *et al.*, 2016b)

Ce rendement, est meilleur que celui de 45% observé lors des essais réalisés à Dakar en mars 2015 (voir § 4.2.) car la température d'attaque de l'air chaud a été maintenue à 60 °C alors qu'elle n'était que de 45°C dans l'essai de Dakar. Ce rendement de 59 %, déjà excellent, pourrait encore être amélioré en augmentant la quantité de fonio à sécher et donc en rajoutant des claies humides lorsque les claies du bas sont sèches et vidées. A titre de comparaison, on peut rappeler que les rendements couramment observés avec les séchoirs à claies classiques type Atesta ne sont que d'environ 20 %.

5. Proposition d'évolution du séchoir CSec-T

5.1. Nouvelle conception du séchoir à flux traversant CSec-T

Le séchoir CSec-T est reconnu pour sa très bonne efficacité énergétique qui permet de réduire la consommation en gaz. La principale contrainte reste la manipulation des claies qu'il est nécessaire de réaliser toutes les 30 min environ et qui représente un travail souvent considéré comme fastidieux par les opérateurs.

Afin de diminuer le nombre de manipulations au cours du séchage du fonio précuit (ou d'autres produits granuleux), la coordination du projet Aval Fonio a proposé de modifier la conception du séchoir CSec-T selon les propositions suivantes (Cruz, 2016):

Chaque cellule sera réalisée de manière à pouvoir contenir chacun 6 niveaux de claies comme cela est illustré en figure 18. Comme la largeur des panneaux de bois contreplaqué est habituellement de 1,2 m, cela permet de réaliser ces 6 niveaux sans avoir à redécouper le panneau de bois sur une de ses dimensions.

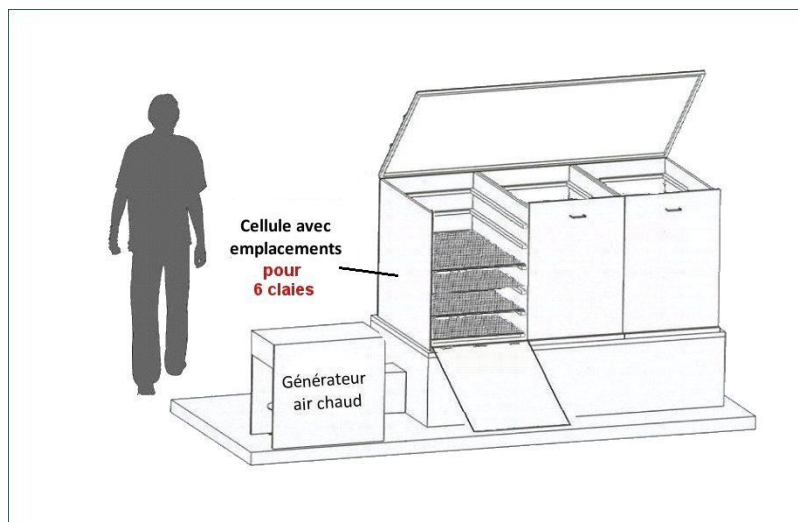


Figure 18. Schéma du séchoir CSec-T avec emplacements pour 6 claies (© J-F Cruz, Cirad).

5.2. Nouveau protocole d'utilisation du séchoir CSec-T

La mise en place et la manipulation des claies peuvent alors être réalisées selon le nouveau protocole illustré en figure 19 suivante:

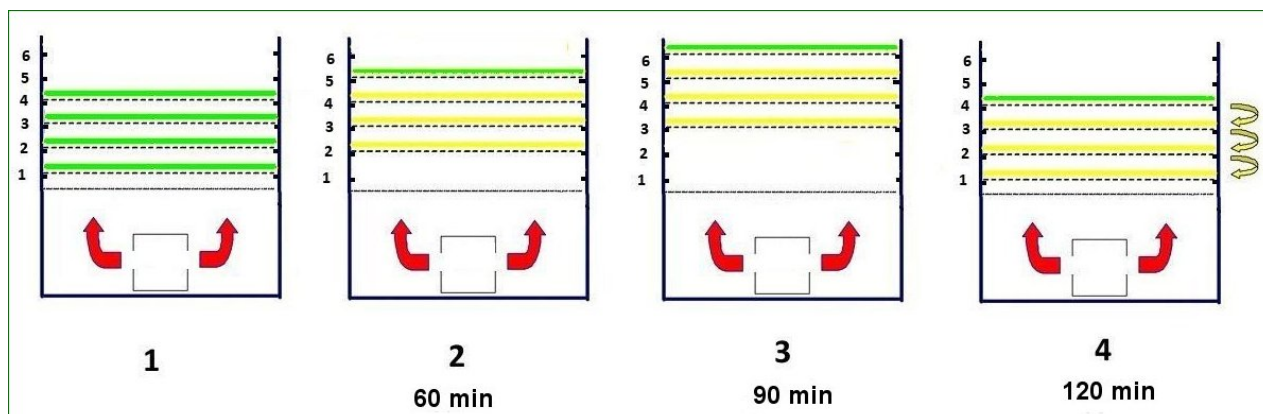


Figure 19. Nouveau protocole de déplacement des claies (© J-F Cruz, Cirad).

Etape 1 : en début de séchage, on doit charger chaque cellule du séchoir avec 4 claies de produit humide. Pour du fonio précuit, on étale environ 5 - 6 kg de fonio humide par claie.

Etape 2 : lorsque le produit des claies de niveau 1 est sec (après environ 60 min), il faut :

- retirer la claie en position 1
- (brasser le produit de la claie en position 2)
- (brasser le produit de la claie en position 3)
- (brasser le produit de la claie en position 4)
- recharger une claie (initialement chargée en produit humide) et la placer en position 5

Etape 3 : lorsque le produit des claies de niveau 2 est sec (soit 30 min plus tard), il faut :

- retirer la claie en position 2
- (brasser le produit de la claie en position 3)
- (brasser le produit de la claie en position 4)
- (brasser le produit de la claie en position 5)
- recharger une claie (la première claie vidée est rechargée en produit humide) et la placer en position 6

Etape 4 : lorsque le produit des claies de niveau 3 est sec (soit encore 30 min plus tard), on procède alors au déplacement des claies. Il faut :

- retirer la claie en position 3
- retirer la claie en position 4, brasser le produit et la descendre en position 1,
- retirer la claie en position 5, brasser le produit et la descendre en position 2,
- retirer la claie en position 6, brasser le produit et la descendre en position 3,
- mettre la claie rechargée en produit humide en position 4.

Puis le cycle recommence comme à l'étape 2

5.3. Intérêt de la proposition d'amélioration du séchoir CSec-T

Cette nouvelle conception nécessite simplement de rehausser chaque cellule du séchoir d'une vingtaine de centimètres pour recevoir les emplacements de 2 niveaux de claies supplémentaires. Il peut également être recommandé de fabriquer 3 claies supplémentaires pour recharger plus rapidement le séchoir en produit humide sans attendre d'avoir vidé la claie de produit sec. Ces améliorations ne devraient pas accroître le coût de fabrication de manière importante.

Cette nouvelle conception a surtout l'avantage considérable de ne nécessiter une manipulation de l'ensemble des claies que toutes les 90 min au lieu de toutes les 30 min; ce qui représente un gain de temps important et une réduction de la pénibilité du travail pour les opérateurs. Une manipulation réduite des claies doit également permettre d'améliorer de manière conséquente le rendement thermique du séchoir puisque la perte d'air chaud lors des manipulations s'en trouve également réduite.

Un séchoir de ce type pourrait être fabriqué par l'ESP/UCAD à Dakar (Sénégal) pour servir de séchoir de démonstration et de formation des opérateurs.

6. Conclusion

Le séchoir CSecT répond au cahier des charges que les chercheurs s'étaient fixé en assurant une capacité de chargement d'environ 100 kg et un débit de séchage de 20 à 25 kg/h pour sécher du fonio humide transformé (blanc ou précuit) de 35% à 10%. En utilisant une température d'attaque de l'air chaud voisine de 60 °C (puissance du brûleur de 8 kW), il permet d'atteindre un rendement énergétique voisin de 60% nettement supérieur à celui de 20 % à 30 % obtenu avec les séchoirs artisanaux en convection naturelle (type Atesta ou Fac 2000). Les opérateurs privés qui ont pu utiliser les séchoirs CSec-T sont satisfaits des bonnes performances observées en conditions réelles d'utilisation. Les spécialistes en mécanisation considèrent donc que cet équipement est validé pour le séchage du fonio transformé (blanchi et/ou précuit). Le séchoir a été conçu pour une fabrication locale dans un processus de recherche-action en partenariat avec les fabricants de séchoirs et les transformatrices (Cruz *et al.*, 2016d). Des entreprises locales comme MOD Engineering au Mali, SOLDEV au Burkina Faso ou d'autres sont en mesure d'assurer la fabrication de l'équipement. Une nouvelle conception avec 6 niveaux de claies pourrait être étudiée afin de diminuer la fréquence de manipulation des claies pour réduire la pénibilité du travail des opérateurs.

7. Bibliographie

- Cruz J-F. 2016. Proposition d'amélioration du séchoir CSec-T. Projet Aval Fonio. Cirad, UMR QualiSud, Montpellier, France. 3p. (document multigraphié à diffusion restreinte)
- Cruz J-F., Goli T., Ferré T., Thaunay P. 2016a. Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique. Projet Aval Fonio. Rapport scientifique et technique final. Cirad –Persyst, Montpellier, France, 48 p.
- Cruz J-F., Goli T., Ferré T., Thaunay P. 2016b. Amélioration de l'après récolte et valorisation du fonio en Afrique. Projet Aval Fonio. Rapport annuel 2015-2016. Cirad –Persyst, Montpellier, France, 47 p.
- Cruz J-F., Rivier M., Ferré T., Delpech A., Diallo A., Kebe C.M.F. 2016c. Manuel d'utilisation du séchoir CSec-T. Projet Aval Fonio, livrable n°15. Cirad. Montpellier. 7 p.
- Cruz J-F., Méot J-M., Rivier M., Kébé C. M. F., Anne A., Diallo A., Delpech A., Ferré T., Medah I., Havard M. 2016d. Séchoir à flux traversant CSec-T. In : Adaptation et résilience du changement climatique pour un développement durable : place et rôle de la science, de la technologie et de l'innovation : FRSIT 2016. Ouagadougou, Burkina Faso. 1 poster
- Cruz J.-F., Hounhouigan D.J., Fleurat-Lessard F., Troude F. 2016e. La conservation des grains après-récolte. Collection Agricultures tropicales en Poche, Quae, Cta, Presses agronomiques de Gembloux, 231 p.
- Cruz J.F., Béavogui F., Dramé D. 2011. Le fonio, une céréale africaine. Collection Agricultures tropicales en Poche, Quae, Cta, Presses agronomiques de Gembloux, 175 p.
- Cruz J.F., Marouzé C., Rivier M., Méot J.M., Drame D., Diarra M., Tangara K., Yalcouyé D. 2008. Amélioration de la qualité du fonio. Développement de séchoirs [Poster]. In : Cruz Jean-François (ed.). Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio en Afrique de l'Ouest. [Cd-Rom]. Montpellier : CIRAD, 1 p.
- Diallo A. 2016. Rapport de mission à Bamako (Mali) et Bobo Dioulasso (Burkina Faso) du 8 au 19 mars 2016. Projet Aval Fonio. ESP-UCAD, Dakar, Sénégal. 9 p. (diffusion restreinte)

- Gomez Eslava C. 2005. Séchage de produits alimentaires dans les pays en développement. Validation de principes de séchoirs. Stage d'ingénieur INSA Département de génie biochimique Cirad-Amis n° 14/2005. Montpellier, France. 40 p. (diffusion restreinte)
- Kébé C.M.F., Cissé M., Ayessou N. 2013. Rapport de mission à Salémata, Kédougou et Kayes du 3 au 7 août 2013. Projet Aval Fonio. ESP-UCAD, Dakar, Sénégal. 8 p. (diffusion restreinte)
- Marouzé C., Cruz J.F., Rivier M. 2008. Equipements pour le séchage du fonio. Projet INCOFONIO. Amélioration de la qualité du fonio et de la compétitivité de la filière fonio en Afrique de l'Ouest. Cirad, Montpellier, France. 10 p.
- Marouzé C., Touaoro Z., Gibert O. 2001. Etude de principes de séchage du fonio. Projet CFC Fonio. Amélioration des technologies post-récolte du fonio. Activité 13. Amélioration et conception d'équipements. Cirad, IER, IRAG, IRSAT. Cirad/Amis N°81/01 Montpellier, France. 15 p. (diffusion restreinte).
- Méot J-M., Rivier M., Cruz J-F. 2016. Plans du séchoir à flux traversant CSec-T. Projet Aval Fonio, livrable n°13. Cirad. Montpellier. 24 p.
- Méot J-M., Marouzé C., Rivier M., Ouedraogo M., Namata H. 2005. Séchoir Cirad à produits granulés. Installation et mise en production au Burkina Faso et formation des utilisateurs. Cirad/Amis N°17/2005 Montpellier, France. 16 p. + annexes (diffusion restreinte).
- Rivier M. 2015. Essais de validation des séchoirs à flux traversant (CSec-T) et « serre solaire » (CSec-S). Projet Aval Fonio. Cirad, Montpellier, France. 20 p.

